

# 상지 재활을 위한 3-D 로봇 시스템의 개발

## Development of a 3-D Rehabilitation Robot System for Upper Extremities

신규현<sup>1,✉</sup>, 이수한<sup>2</sup>  
Kyu Hyeon Shin<sup>1,✉</sup> and Soo Han Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 울산대학교 대학원 기계자동차공학과 (Department of Mechanical and Automotive Engineering, Graduate School, Ulsan Univ.)

<sup>2</sup> 울산대학교 기계자동차공학부 (School of Mechanical and Automotive Engineering, Ulsan Univ.)

✉ Corresponding author: khshin111@ulsan.ac.kr, Tel: 052-259-2149

Manuscript received: 2008.4.8 / Revised: 2008.8.19, 11.24 / Accepted: 2009.1.9

*A 3-D rehabilitation robot system is developed in this paper. The robot system is for the rehabilitation of upper extremities, especially the shoulder and elbow joints, and has 3-D workspace for enabling occupational therapy to recover physical functions in activities of daily living(ADL). The rehabilitation robot system, which is driven by actuators, has 1 DOF in horizontal rotational motion and 2 DOF in vertical rotational motion, where all actuators are set on the ground. Parallelogram linkage mechanisms lower the equivalent inertia of the control elements as well as control forces. Also the mechanisms have high mechanical rigidity for the end effector and the handle. Passive motion mode experiments have been performed to evaluate the proposed robot system. The results of the experiments show an excellent performance in simulating spasticity of patients.*

Key Words: Rehabilitation Therapy (재활 치료), Rehabilitation Robot (재활 로봇), Upper Extremities (상지), Passive Motion Mode (수동운동 모드)

### 1. 서론

국민의 의료 수준의 향상으로 평균 수명이 꾸준히 증가하고 있어 65 세 이상의 노인인구가 2005 년 9.1%에서 2018 년 14.3%로 고령사회에 진입할 것으로 예상되고, 2026년에는 20.8%로 증가될 전망이다.<sup>1</sup> 이처럼 노인인구의 증가에 따라 이들의 신체적 기능 저하를 막고 정상적인 사용이 가능하도록 도와주거나, 척수 손상이나 뇌졸중 후에 수반되는 편마비 증상의 재활을 위한 재활로봇에 대한 연구가 최근 주목을 받고 있다.

이런 관점으로 재활로봇의 응용을 살펴보면 근력과 관절의 운동범위 등과 같은 운동 특성을 진단하는 연구,<sup>2</sup> 운동장애를 치료 또는 훈련시키는

시스템에 대한 연구, 이동로봇이나 로봇 팔이 장착된 휠체어 등과 같은 시스템에 대한 연구 등이 있다.<sup>3</sup> 여기서 재활치료는 신체의 기능을 향상시켜 장애를 최소화하고 장애와 불가를 없애는데 그 목적이 있다. 이러한 재활치료에는 물리치료, 운동치료, 작업치료 등이 있으며,<sup>4</sup> 본 연구에서 적용할 작업치료는 일상생활동작(ADL)에 필요한 상지 기능의 향상에 역점을 둔다.

기존의 재활치료사에 의한 재활치료와 비교하여 로봇을 이용한 재활치료는 재활치료사 한 명이 로봇을 이용하여 여러 명의 환자를 훈련시킬 수 있으므로 환자 일인당 훈련 횟수와 지속 정도를 증가시킬 수 있고, 이는 치료기간을 단축하는 효과를 가져와 개인적인 비용의 절감도 기대할 수

있게 될 것이다.

Cozens<sup>5</sup>은 뇌 손상 후에 발생하는 특유의 운동 장애인 근육의 약화와 경직 증상을 가진 환자를 대상으로 팔꿈치의 굽힘-펴는 능동운동을 보조하는 1 자유도 로봇을 소개하였다. Sakaguchi<sup>6</sup>는 ER 유체의 특성을 이용한 액추에이터를 사용하여 어깨와 팔꿈치의 작업치료를 위한 2 자유도 재활 훈련 시스템을 제작하였고, Morita<sup>7</sup>는 운동기능 회복을 위한 작업치료를 보조하는 재활 시스템을 소개하였다. 이 시스템은 2 자유도 X-Y 테이블 형태의 시스템으로 근력과 상지의 운동범위를 측정하기 위해 근전도 기록 장치와 CCD 카메라를 사용하였으며, 어깨와 팔꿈치의 일상생활동작을 위한 훈련을 보조한다. Ellsworth<sup>8</sup>는 기존의 재활 로봇 시스템이 고가임에 착안하여 시장에서 판매되는 조이스틱을 이용한 상지 재활 시스템을 제안하였다.

최근 상지 재활치료를 위한 연구는 일상생활동작을 위한 훈련에 많이 초점이 맞추어져 있다. 이를 위해서는 로봇이 공간상의 움직임이 가능해야 하므로 많은 자유도를 가져야 하며, 작업공간이 넓어야 한다. Nef<sup>9</sup>는 이런 관점으로 로봇을 크게 말단장치를 기준으로 하는 로봇과 외골격 형태의 로봇으로 구분하였다.

3 차원 공간상의 운동이 가능한 로봇을 살펴보면 먼저 상업적으로 개발되어 실제 재활치료에 사용되고 있는 MIT-MANUS 가 대표적이다.<sup>10</sup> MIT-MANUS 는 뇌졸중 후 수반되는 편마비 환자의 상지 특히 팔꿈치와 어깨의 재활치료를 위한 로봇으로 모터로 구동되는 5 절 링크장치, 포텐서미터, 토크 센서 등으로 구성되어 있으며, Krebs<sup>11</sup>와 Fasoli<sup>12</sup>은 게임으로 구성된 재활 프로그램을 이용한 임상시험을 통해 효과를 입증하였다. 또한 Williams,<sup>13</sup> Krebs<sup>14,15</sup> 그리고 Masia<sup>16</sup>은 MIT-MANUS 를 기본 모듈로 사용하고 손목재활 위한 로봇, 공간상의 운동을 위한 상지의 상하 수직운동 로봇, 손 운동을 위한 로봇을 각각 모듈로 개발, 기본 모듈에 장착할 수 있도록 하여 3 차원 공간상의 재활 훈련 및 팔 전체의 재활 훈련이 가능한 시스템을 소개하였다. Lum<sup>17,18</sup>과 Bugar<sup>19</sup>는 편마비 환자의 3 차원 공간에서 상지 재활훈련을 위한 로봇으로 MIME 을 개발하여 다양한 재활모드를 이용한 임상시험 결과를 소개하였다.

Koyanagi<sup>20</sup>와 Furusho<sup>21,22</sup>는 3 차원 공간에서 상지의 재활 훈련을 위한 로봇을 개발하였다. 3 자유도를 가지는 이 로봇은 ER 액추에이터를 이용한

구동으로 기계적인 안정성을 향상시키고, 타이밍 벨트 장치를 이용하여 기계적인 강성을 높인 것이 특징이다. Nef<sup>23</sup>와 Mihelj<sup>24</sup>은 반외골격 구조를 가지는 로봇을 소개하였다. 척수손상이나 뇌졸중 후에 수반되는 상지 불완전마비나 완전마비 환자의 일상생활동작의 훈련에 적용할 수 있는 로봇으로, 어깨와 팔꿈치의 원활한 운동을 위해 6-7 자유도로 구성되어 있고 넓은 작업공간과 다양한 환자의 체격에 맞추어 조절할 수 있는 것이 특징이다.

본 연구에서는 3 차원 공간상의 재활 훈련, 특히 작업치료를 위한 새로운 형태의 로봇을 설계, 제작하였다. 말단장치를 기준으로 하는 다관절 형상의 3 자유도 로봇으로써, 좁은 공간을 점유하면서도 상대적으로 작업공간이 넓은 팔꿈치 형의 특징과 모든 액추에이터가 테이블에 부착된 링크에 위치하고 있어 나머지 링크들을 더 가볍게 할 수 있고, 따라서 작은 동력의 모터로도 좋은 역구동성을 가지는 평행사변 형 링크 장치의 특징을 모두 가진다. 먼저 기구학 해석을 한 다음 전체 시스템과 재활 프로그램의 구성을 살펴보고, 안전을 위한 대책을 소개한다. 마지막으로 수동운동에 대한 실제 실험을 통해 로봇을 이용한 재활훈련의 가능성을 확인한다.

## 2. 기구학 해석

### 2.1 순기구학

순기구학 방정식을 유도하기 위해서 보편적으로 사용하는 Denavit-Hartenberg 규약을 이용하여 Fig. 1 과 같이 좌표계를 결정하였다.

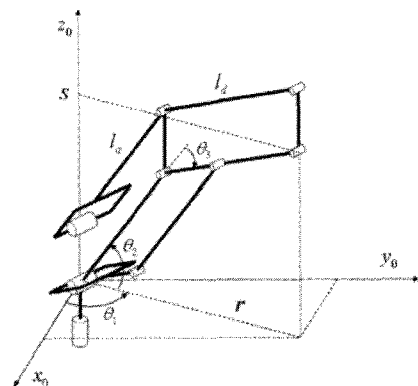


Fig. 1 Definition of coordinate systems

이 규약은 간단히 각 동차변환 행렬  $A_i$  을 4 개

의 기본 변환행렬의 곱으로 표현하는 것으로 식(1)과 같이 나타낼 수 있으며, 여기서  $a_i$  는 길이(length),  $\alpha_i$  는 비틀림(twist),  $d_i$  는 오프셋(offset), 그리고  $\theta_i$  는 각도(angle)를 뜻한다.

$$A_i = Rot_{z,\theta_i} Trans_{z,d_i} Trans_{x,\alpha_i} Rot_{x,\alpha_i}$$

$$= \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i}c_{\alpha_i} & s_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_i c_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i}c_{\alpha_i} & -c_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_i s_{\theta_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

본 논문에서 제안한 매니플레이터의 링크 파라미터를 구하고, 식(1)에 적용하여 정리하면 순기구학 방정식은 식(2)과 같다.

$$T_0^3 = A_1 A_2 A_3,$$

$$T_0^3 = \begin{bmatrix} c_1 c_{23} & -c_1 s_{23} & s_1 & l_a c_1 c_2 + l_d c_1 c_{23} \\ s_1 c_{23} & -s_1 s_{23} & -c_1 & l_a s_1 c_2 + l_d s_1 c_{23} \\ s_{23} & c_{23} & 0 & l_a s_2 + l_d s_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서,

$$c_1 = \cos \theta_1, s_1 = \sin \theta_1, c_2 = \cos \theta_2, s_2 = \sin \theta_2,$$

$$c_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3), s_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_3),$$

$l_a$ : 링크 a 의 길이,  $l_d$ : 링크 d 의 길이를 뜻한다.

### 2.2 역기구학

말단장치의 위치로부터 관절변수를 역으로 찾기 위해 Fig. 1 을 이용한 4-4 분면 역탄젠트 함수를 사용한다. 여기서, 4-4 분면 역탄젠트는 두 개의 변수를 갖는 역탄젠트 함수를 뜻하며

$$A \tan 2(y, x) = \tan^{-1} \left( \frac{y}{x} \right)$$

로 표시된다. 먼저 매니플레이터의 말단장치 좌표를  $(x, y, z)$  라 두고 이것을  $x_0 y_0$  평면에 투영을 하면

$$\theta_1 = A \tan 2(y, x) \quad (3)$$

임을 알 수 있고, 코사인 법칙을 이용하여 나머지 관절변수에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\theta_3 = A \tan 2(\pm \sqrt{1 - D^2}, D), \quad (4)$$

$$\theta_2 = A \tan 2(s, r) - A \tan 2(l_d s_3, l_a + l_d c_3)$$

$$= A \tan 2(z, \sqrt{x^2 + y^2}) - A \tan 2(l_d s_3, l_a + l_d c_3) \quad (5)$$

여기서,

$$D = \frac{r^2 + s^2 - l_a^2 - l_d^2}{2l_a l_d}$$

을 뜻한다.

### 2.3 속도기구학

로봇 말단장치의 직각 좌표계 속도와 관절속도와의 관계를 결정짓는 자코비안은 로봇 운동의 해석과 제어에 가장 중요한 양 중의 하나로서 로봇 조작, 특이형상의 결정, 동역학 운동방정식의 유도, 말단장치의 직각 좌표계 힘과 관절 토크 사이의 변환 등에 쓰이게 된다. 이러한 자코비안은 순기구학 변환을 미분함으로써 계산할 수 있으며, 식(2)을 미분하여 정리하면 자코비안,  $J$  는 다음과 같이 구해진다.

$$\dot{X} = J\dot{\theta},$$

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서,

$$J_{11} = -l_a s_1 c_2 - l_d s_1 c_{23},$$

$$J_{12} = -l_a c_1 s_2 - l_d c_1 s_{23},$$

$$J_{13} = -l_d c_1 s_{23},$$

$$J_{21} = l_a c_1 c_2 + l_d c_1 c_{23},$$

$$J_{22} = -l_a s_1 s_2 - l_d s_1 s_{23},$$

$$J_{23} = -l_d s_1 s_{23},$$

$$J_{31} = 0,$$

$$J_{32} = l_a c_2 + l_d c_{23},$$

$$J_{33} = l_d c_{23}$$

이다.

대부분의 매니플레이터는 자코비안이 특이점을 가지게 되며 이를 확인하는 것은 아주 중요하다. 특이점을 찾기 위해서 식(6)의 행렬식을 구해보면

$$\det J = -l_a l_d s_3 (l_a c_2 + l_d c_{23}) \quad (7)$$

이 되고, 식(7)이 0 이 되기 위한 조건은  $s_3 = 0$ , 즉  $\theta_3 = 0, \pi$  일 때나  $l_a c_2 + l_d c_{23} = 0$  일 때임을 알 수 있다. 첫 번째 경우는 팔꿈치가 완전히 펼쳐지거나 굽혀질 때를 의미하고, 두 번째 경우는 매니플레이터의 끝점이 기준 회전축  $z_0$  위에 놓이는 경우를 의미한다. 본 논문에서는 관절부분의 형상 설계를 이용한 매니플레이터의 운동 제한으로 이 두 가지의 특이점이 생기지 않도록 설계하였다.

### 2.4 작업 공간

본 논문에서 설계, 제작한 로봇 매니플레이터의 작업 공간은 Fig. 2 와 Fig. 3 에 나타내었다.

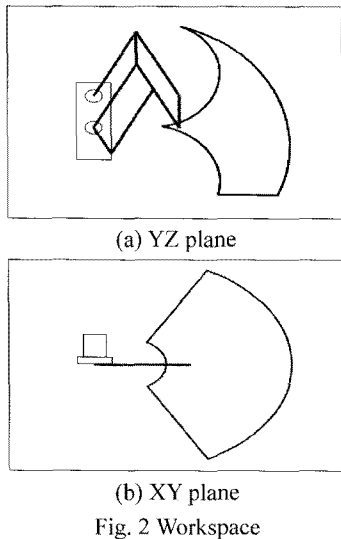


Fig. 2 Workspace

여기서, Fig. 2 는 링크간의 간섭, 토크의 제한, 배선 등을 고려한 경우의 작업 공간을 나타낸 것이다. 또한 치료를 위한 환자의 자세, 환자의 안전을 위한 작업 공간의 확보 등을 위해 리미트스위치로 운동범위를 제한한 경우의 실제 작업공간을 Fig. 3 에 빗금 친 영역으로 나타내었다.

Fig. 3 에서  $X \times Y \times Z = 580 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$  의 작업 공간을 가지며, 리미트스위치의 위치

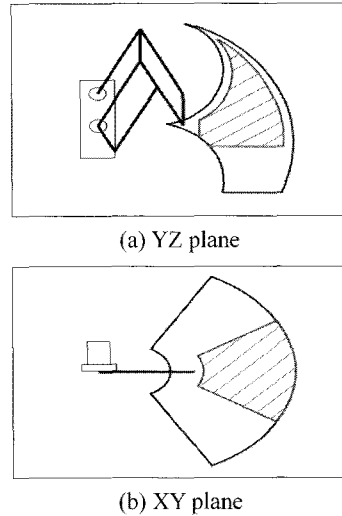


Fig. 3 Actual workspace

변화에 따라 작업 공간의 변화가 생길 수 있다. 이는 다양한 형태와 방향으로 작업치료가 가능할 뿐만 아니라 매니플레이터의 위치를 조정 가능하게 한다면 재활 정도에 따른 다양한 자세에서의 치료도 가능할 것이라 생각된다.

## 3. 재활 로봇 시스템의 구성

### 3.1 전체 시스템의 구성

재활 로봇 시스템의 전체 구성도와 제작된 로봇 시스템은 각각 Fig. 4, Fig. 5 와 같으며 직렬과 병렬이 혼합된 형태의 매니플레이터, 구동 모터, 힘센서, 구동 모터용 드라이브 및 전원 공급 등의 회로가 들어 있는 제어 박스, PC, 테이블 등으로 이루어져 있다.

구동부는 감속기와 브레이크가 결합된 3 개의 AC 서보 모터를 사용하고 있으며, 각각의 모터에는 증분형 엔코더가 부착되어 있어 모터의 회전각을 측정한다. 또한 스트레인 게이지를 이용해 자체 제작한 3 축 힘센서를 사용하여 작업 공간에서의 힘을 측정한다. 제어 박스에는 모터 드라이브, 힘센서용 전원 및 센서관련 회로, 모터 브레이크용 전원 및 전원 공급 회로, 링크의 운동 범위 제한을 위한 리미트스위치용 회로, 비상정지 버튼 회로 등으로 구성되어 있으며, PC 에서 계산된 제어 입력을 모터 드라이브에 보내기 위한 D/A 변환기, 모터의 위치 신호를 받기 위한 카운터 보드, 힘센서의 신호와 리미트스위치 신호를 받기 위한 A/D 변

환기를 사용하였다.

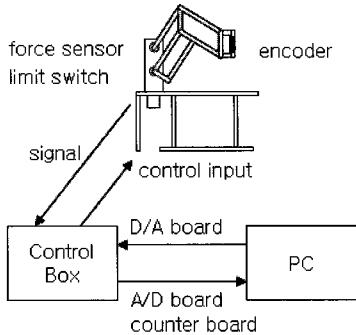


Fig. 4 Configuration of rehabilitation robot system

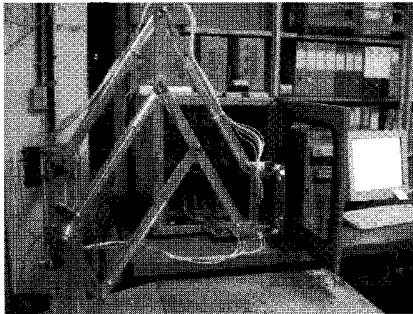


Fig. 5 The rehabilitation system for upper extremities

본 논문에서 환자의 안전을 고려한 단계별 대책은 다음과 같이 구현하였다.

- 1 단계: 구동 프로그램에서의 제한
- 2 단계: 리미트스위치를 이용한 운동 범위 제한
- 3 단계: 관절부분의 형상에 의한 운동 제한
- 4 단계: 비상정지 버튼에 의한 모터 전원 공급 차단 및 모터 브레이크 작동

1 단계에서 모터 출력 전압, 모터의 속도를 제한하고, 2 단계에서는 각 모터마다 2 개의 리미트 스위치로 운동 범위를 제한하고 만약 리미트 스위치가 작동하면 브레이크가 작동하도록 되어 있고, 2 단계를 넘는 오동작이 있을 때에는 관절부분의 형상에 의해 더 이상 운동이 불가능한 상태가 되도록 하였다. 또한 비상정지 버튼은 환자의 옆에서 재활 치료사가 위험하다고 판단되는 순간에 누름으로써 모터 공급 전원이 차단되고 모터 브레이크가 작동하도록 구성되어 있다.

### 3.2 재활 프로그램의 구성

재활 프로그램의 전체 흐름도는 Fig. 6 과 같다.

본 논문에서는 환자가 최대한 팔꿈치와 어깨에 힘을 주지 않은 상태에서 로봇이 움직이는 데로 따라 운동을 하는 수동운동 모드를 구현하였다. 수동운동은 환자의 관절 운동범위를 크게 하는데 효과가 있으며, 이는 관절 운동범위의 제한으로 발생하는 근육의 약화, 통증, 부종 등의 2 차적인 증상을 막을 수 있다.

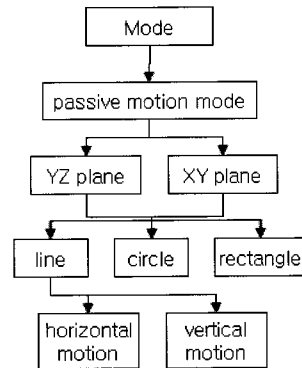


Fig. 6 Flow diagram of rehabilitation therapy

수동운동 모드는 재활훈련 테이블과 평행한 XY 평면 운동과 테이블에 수직인 YZ 평면 운동으로 나누어지고, 각각의 운동은 수평 운동과 상하 운동으로 이루어진 직선 운동, 원 운동, 사각형 운동으로 구성된다.

### 4. 실험 및 결과

본 논문에서는 수동운동 모드에 대한 실험을 수행하였다. 수동운동 모드는 환자가 손잡이를 잡은 상태에서 로봇이 치료에 필요한 경로를 따라 운동을 한다. 운동을 하는 동안에 계속적으로 힘 센서로부터 각 방향의 힘을 측정하고 미리 설정한 힘의 한계 값을 넘게 되면 현재 환자가 통증을 호소하는 경직 증상이 일어났다고 판단하여 현재의 위치에서 정지하게 된다. 경직 증상이 풀려 힘이 한계 값 이내로 들어오면 일정시간 대기하였다가, 이전 운동 속도보다 느린 속도로 운동을 계속하게 된다. 본 실험에서는 힘의 한계 값은 60N, 대기 시간은 4 초, 그리고 대기후의 속도는 이전 속도의 1/2 로 설정하였다.

실험은 개발한 로봇 시스템의 안전을 고려한 대책, 작업 영역, 말단장치의 궤적추종 정도 등을 확인하기 위하여 수행하였으며 환자를 가정한 일

반인을 대상으로 하였다. 따라서 수동운동 중에 발생하는 경직증상은 사용자가 임의로 힘을 발생시켜 팔이 더 이상 움직이지 않는 상태를 만들어 구현하였으며 통증을 유발하는 힘의 한계 값은 실제 치료에서도 치료 시기, 환자마다 다르므로 재할치료가 언제든지 설정이 가능하도록 하였다.

실험 시에는 Fig. 7 과 같이 환자가 팔을 몸 앞 쪽에서 출발해서 정면을 향하여 반시계 방향으로 지름 40cm 의 원을 그리는 경로의 동작을 대상으로 하였는데 이 동작의 수동운동은 어깨와 팔꿈치

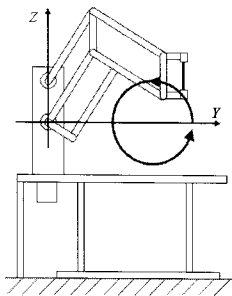
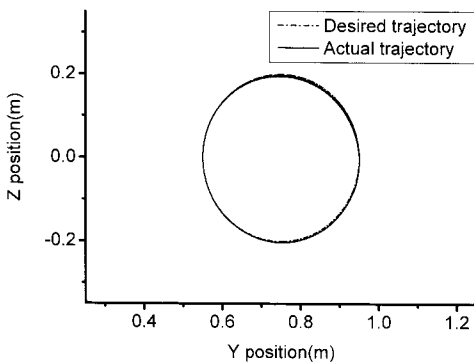
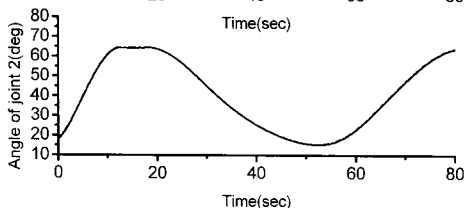
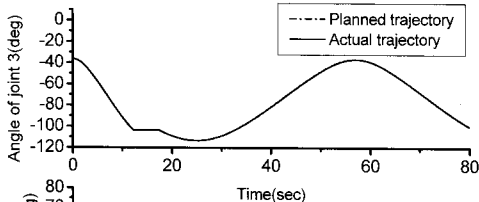


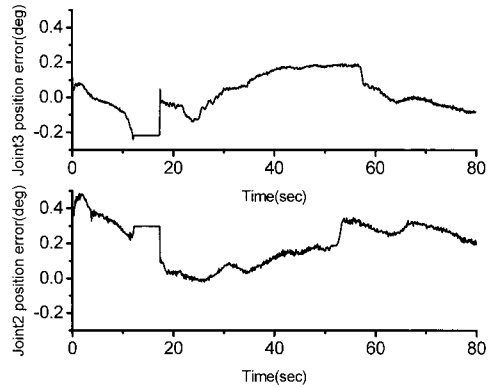
Fig. 7 Desired trajectory of end-effector



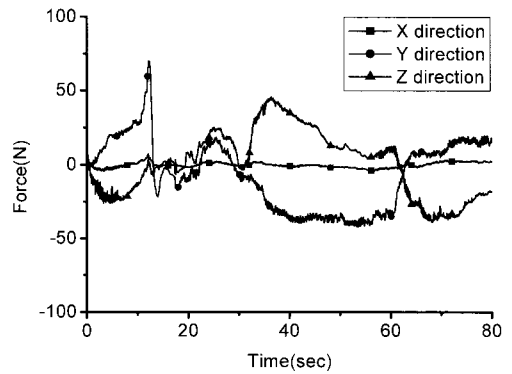
(a) Trajectory of end-effector



(b) Angles of joints



(c) Position error of joint 2 and 3



(d) Forces of X, Y and Z direction

Fig. 8 Results of passive motion mode experiments

관절의 운동범위를 증가시키는 효과가 있는 것으로 알려져 있다.

Fig. 8(a)에서는 말단장치의 원하는 궤적에 따른 실제 말단장치의 궤적추종 정도를 나타내었고, 이때 관절 2와 3의 실험결과를 Fig. 8(b)에 나타내었다. Fig. 8(c)는 관절 2와 3에서 발생하는 위치오차를 나타낸 것으로 그 최대크기는 관절 2와 3에서 각각 0.48°, 0.22°로 거의 무시할 정도였다. 또한 Fig. 8(d)에서 볼 수 있듯이 12.3초에 임의로 설정한 힘의 한계 값을 넘어서는 값이 측정되었으며, 이때 환자에게 통증을 유발하는 경직 증상이 일어났다고 판단하여 로봇이 멈춘다. 이러한 멈춤 현상은 Fig. 8(b)와 (c)에서 볼 수 있다. 이후 경직 증상이 완화되어 힘이 한계 값 이내로 들어오면 일정시간 대기하였다가 이전 운동속도의 절반으로 운동을 계속하게 된다. 경직이 없는 경우 원하는 궤적을 완성하는데 32초가 걸리지만, 실험 중에 발생한 경직증상에 의해서 12.3초 이후에는 경직에 대비하여 계획된 궤적을 따랐기에 완성하는데

64 초가 걸렸다. 이는 경직증상의 완화에 대한 대기시간과 경직 후의 운동속도를 절반으로 줄였기 때문이다.

이 실험을 통해 로봇이 환자에게 계속 운동을 시킬 경우 통증을 유발하는 경직 증상이 발생하였을 때 운동을 정지하고, 계속적으로 힘을 측정하여 경직 증상이 완화되었다고 판단되면 환자의 안전을 고려하여 운동속도를 반으로 줄여서 운동을 계속함으로써 수동 운동 중에 발생할 수 있는 경직 상황에 잘 대처함을 알 수 있었다.

**5. 결론**

본 논문에서는 3 차원 공간상에서의 상지, 특히 어깨와 팔꿈치의 재활훈련을 위한 새로운 재활 로봇 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 말단장치를 기준으로 하는 3 자유도 로봇 시스템으로 다양한 환자의 신체 크기에 적용하기 쉽고, 역구동성이 좋으며 특히 넓은 작업공간을 가지는 특징이 있다. 기구학 해석을 통해 기계적인 제한 범위 내에서의 구동범위를 확인하였고, 환자의 안전을 고려한 여러 가지 대책을 구현하였다.

또한 수동운동 모드에 대한 실험을 통해 환자의 경직과 같은 상황에 잘 대처할 수 있음을 확인하였다. 현재 더욱 다양한 궤적을 가지는 수동운동 모드에 대한 연구와 수동운동의 단계를 넘어선 환자에게 적용할 능동운동 모드에 대한 연구가 진행 중이다.

**참고문헌**

1. Korea National Statistical Office, "Population Projections for Korea," Korea National Statistical Office, 2007.
2. Bardorfer, A., Munih, M., Zupan, A. and Primožic, A., "Upper Limb Motion Analysis Using Haptic Interface," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 6, No. 3, pp. 253-260, 2001.
3. Bien, Z. N., Kim, D. J., Chung, M. J., Kwon, D. S. and Chang, P. H., "Development of a Wheelchair-based Rehabilitation Robotic System (KARES II) with Various Human-Robot Interaction Interface for the Disabled," Proc. of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Vol. 2, pp. 902-907, 2003.

4. Kim, J. H. and Han, T. Y., "Rehabilitation Medicine 2nd Edition," Koonja Publishing Inc., pp. 9-138, 2003.
5. Cozens, J. A., "Robotic Assistance of an Active Upper Limb Exercise in Neurologically Impaired Patients," IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, Vol. 7, No. 2, pp. 254-256, 1999.
6. Sakaguchi, M., Furusho, J. and Genda, E., "Basic Study on Rehabilitation Training System Using ER Actuators," Proc. of IEEE International Conference, Vol. 1, pp. 135-140, 1999.
7. Morita, Y., Akagawa, K., Yamamoto, E., Ukai, H. and Matsui, N., "Basic Study on Rehabilitation Support System for Upper Limb Motor Function," Proc. of IEEE 7<sup>th</sup> International Workshop on Advanced Motion Control(AMC'02), pp. 127 -132, 2002.
8. Ellsworth, C. and Winters, J., "An Innovative System to Enhance Upper-Extremity Stroke Rehabilitation," Proc. of 25<sup>th</sup> IEEE/EMBS International Conference, pp. 1617-1620, 2003.
9. Nef, T. and Riener, R., "ARMin-Design of a Novel Arm Rehabilitation Robot," Proc. of IEEE 9<sup>th</sup> International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR), pp. 57-60, 2005.
10. Hogan, N., Krebs, H. I., Charnnarong, J., Srikrishna, P. and Sharon, A., "MIT-MANUS: A Workstation for Manual Therapy and Training," Proc. of IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pp. 161-165, 1992.
11. Krebs, H. I., Hogan, N., Aisen, M. L. and Bruce, B. T., "Robot-aided Neurorehabilitation," IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, Vol. 6, No. 1, pp. 75-87, 1998.
12. Fasoli, S. E., Krebs, H. I., Stein, J., Frontera, R., Hughes, R. and Hogan, N., "Robotic Therapy for Chronic Motor Impairments after Stroke: Follow-up Results," Arch. Phys. Med. Rehabilitation, Vol. 85, No. 7, pp. 1106-1111, 2004.
13. Williams, D. J., Krebs, H. I. and Hogan, N., "A Robot for Wrist Rehabilitation," Proc. of 23<sup>rd</sup> EMBS International Conference, Vol. 2, pp. 1336-1339, 2001.
14. Krebs, H. I., Ferraro, M., Buerger, S. P., Newbery, M. J., Makiyama, A., Sandmann, M., Lynch, D., Volpe, B. T. and Hogan, N., "Rehabilitation Robotics: Pilot

- Trial of a Spatial Extension for MIT-MANUS," *Journal of Neuro-Engineering and Rehabilitation*, Vol. 1, No. 5, pp. 1-15, 2004.
15. Krebs, H. I., Volpe, B. T., Williams, D. J., Celestino, J., Charles, S. K., Lynch, D. and Hogan, N., "Robot-aided Neurorehabilitation: A Robot for Wrist Rehabilitation," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 327-335, 2007.
  16. Masia, L., Krebs, H. I., Cappa, P. and Hogan, N., "Design and Characterization of Hand Module for Whole-arm Rehabilitation Following Stroke," *IEEE /ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 12, No. 4, pp. 399-407, 2007.
  17. Lum, P. S., Van der Loos, H. F. M., Shor, P. and Burgar, C. G., "A Robotic System for Upper-limb Exercises to Promote Recovery of Motor Function Following Stroke," *Proc. of IEEE 6<sup>th</sup> International Conference on Rehabilitation Robotics*, pp. 235-239, 1999.
  18. Lum, P. S., Burgar, C. G., Van der Loos, H. F. M., Shor, P. C., Majmundar, M. and Yap, R., "The MIME Robotic System for Upper-limb Neurorehabilitation: Results from a Clinical Trial in Subacute Stroke," *Proc. of IEEE 9<sup>th</sup> International Conference on Rehabilitation Robotics*, pp. 511-514, 2005.
  19. Burgar, C. G., Lum, P. S., Shor, P. C. and Van der Loos, H. F. M., "Development of Robots for Rehabilitation Therapy: The Palo Alto VA/ Stanford Experience," *Journal of Rehabilitation Research and Development*, Vol. 37, No. 6, pp. 663-673, 2000.
  20. Koyanagi, K., Furusho, J., Ryu, U. and Inoue, A., "Rehabilitation System with 3-D Exercise Machine for Upper Limb," *Proc. of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Vol. 2, pp. 1222-1227, 2003.
  21. Furusho, J., Koyanagi, K., Imada, Y., Fujii, Y., Nakanishi, K., Domen, K., Miyakoshi, K., Ryu, U., Takenaka, S. and Inoue, A., "A 3-D Rehabilitation System for Upper Limbs Developed in a 5-year NEDO Project and Its Clinical Testing," *Proc. of IEEE 9<sup>th</sup> International Conference on Rehabilitation Robotics*, pp. 53-56, 2005.
  22. Furusho, J., Shichi, N., Hu, X., Kikuchi, T., Nakayama, K., Li, C., Yamaguchi, Y., Inoue, A. and Ryu, U., "Development of a 6-DOF Force Display System with High Safety and Its Application to Rehabilitation," *Proc. of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 962-967, 2006.
  23. Nef, T., Mihelj, M. and Riener, R., "ARMin: A Robot for Patient-cooperative Arm Therapy," *Medical & Biological Engineering & Computing*, Vol. 45, No. 9, pp. 887-900, 2007.
  24. Mihelj, M., Nef, T. and Riener, R., "ARMin II-7 DOF Rehabilitation Robot: Mechanics and Kinematics," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4120 -4125, 2007.